

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-173306

(43)Date of publication of application : 26.06.1998

(51)Int.Cl.

H05K 1/14
// C23C 28/00

(21)Application number : 08-327094

(71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 06.12.1996

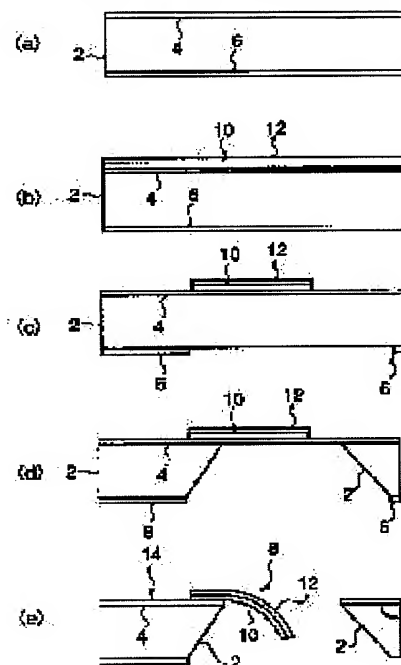
(72)Inventor : OTA YOSHINORI

(54) MANUFACTURING METHOD OF SHAPE MEMORY ALLOY THIN-FILM ACTUATOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To achieve high efficiency manufacturing method of an actuator having SMA thin film by subjecting a shape memory alloy thin film on an insulating film to crystallizing heat-treatment and to a shape memory treatment, then patterning it into a predetermined form, etching a part of an insulating film on the back of the substrate, and etching the substrate via the remaining insulating film.

SOLUTION: Insulating films 4, 6 are formed on the opposite surfaces of a silicon substrate 2, and after a lower layer film 10 consisting of TiNi-alloy is formed on this insulating film 4, an upper layer film 12 consisting of TiNi- alloy is formed on this lower layer film 10. Herein, the internal stresses and the composition of the upper layer film 12 and the lower layer film 10 can be set arbitrarily. Then, the upper layer film 12 and the lower layer film 10 are subjected to heat treatment for memorizing a crystallized and flattened form. Then, the upper layer film 12 and the lower layer film 10 are patterned into a U-shaped cantilever form, and a part of a mask 6 is removed to expose the silicon substrate 2, and the silicon substrate 2 is subjected to an anisotropic etching treatment via the remaining mask 6.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-173306

(43) 公開日 平成10年(1998) 6月26日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 5 K 1/14

H 0 5 K 1/14

H

// C 2 3 C 28/00

C 2 3 C 28/00

E

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号

特願平8-327094

(22) 出願日

平成 8 年(1996) 12 月 6 日

(71) 出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷 2 丁目 43 番 2 号

(72) 発明者 太田 好紀

東京都渋谷区幡ヶ谷 2 丁目 43 番 2 号 オリ

ンパス光学工業株式会社内

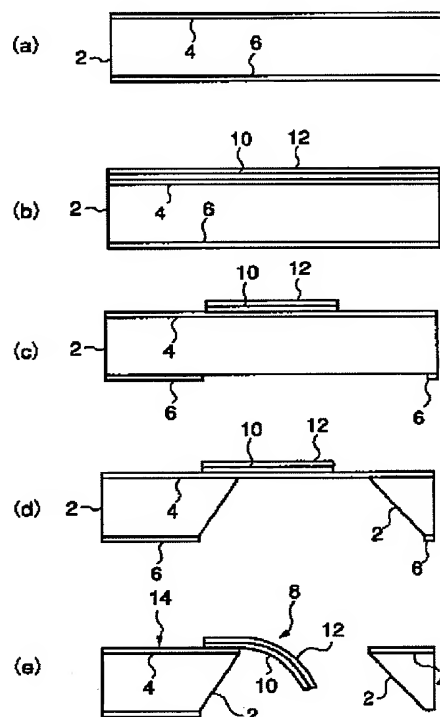
(74) 代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外 4 名)

(54) 【発明の名称】 形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法

(57) 【要約】

【課題】 半導体製造プロセスによって、所望形状の S M A 薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することが可能な形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法を提供する。

【解決手段】 シリコン基板 2 の両面に絶縁膜 4, 6 を形成する工程と、T i N i 合金から成り且つ所定の内部応力を有する下層薄膜 1 0 及び上層薄膜 1 2 から成る形状記憶合金薄膜 (SMA 薄膜) をシリコン基板の表面に形成された絶縁膜 4 上に成膜する工程と、SMA 薄膜を結晶化させるための結晶化熱処理工程と、SMA 薄膜に平坦状の形状を記憶させるための形状記憶処理工程と、フォトリソグラフィによって SMA 薄膜を所定形状にパターニングする工程と、シリコン基板の裏面に形成された絶縁膜 6 の一部をエッチング除去する工程と、残留している絶縁膜を介してシリコン基板に異方性エッチングを施す工程とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板の両面に絶縁膜を形成する絶縁膜形成工程と、
所定の合金材料から成り且つ所定の内部応力を有する形状記憶合金薄膜を前記基板の表面に形成された前記絶縁膜上に成膜する成膜工程と、
前記形状記憶合金薄膜を結晶化させるための結晶化熱処理工程と、
前記形状記憶合金薄膜に形状記憶処理を施す形状記憶処理工程と、
前記形状記憶合金薄膜を所定形状にパターンニングするパターンニング工程と、
前記基板の裏面に形成された前記絶縁膜の一部をエッチング除去する工程と、
前記基板の裏面に残留した前記絶縁膜を介して前記基板をエッチングする工程とを有することを特徴とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法。

【請求項2】 前記形状記憶処理工程において、前記形状記憶合金薄膜には、平坦状の形状を記憶させることを特徴とする請求項1に記載の製造方法。

【請求項3】 前記パターンニング工程において、前記形状記憶合金薄膜は、フォトリソグラフィによって、所定形状にパターンニングされることを特徴とする請求項1に記載の製造方法。

【発明の詳細な説明】**【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、形状記憶効果を有する形状記憶合金薄膜アクチュエータに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、例えば特公昭62-14619号公報（以下、第1の従来技術という）及び特開平6-340963号公報（以下、第2の従来技術という）に開示されているように、形状記憶処理を施された形状記憶合金薄膜（以下、SMA (shapememory alloy) 薄膜という）を用いたアクチュエータが知られている。

【0003】第1の従来技術のSMA薄膜は、溶解形成した所定原子%のTiNi合金に熱処理を施した後、機械的に拘束した状態で時効処理を施すことによって製造されている。

【0004】第2の従来技術のSMA薄膜は、形状記憶合金から成る膜をフレキシブル基材に密着形成することによって製造されており、膜の形状記憶効果に基づいて当該膜と基材とが一体的に変形するように構成されている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】第1及び第2の従来技術において、SMA薄膜は、他のアクチュエータ構成部品とは別途独立して製造されており、特に、所定の屈曲形状を記憶するためには、所定形状の型治具に機械的に拘束しながら数時間～数十時間の熱処理（形状記憶処理）

を施す必要がある。

【0006】このような形状記憶処理は、複雑な処理プロセスが必要となるだけで無く、その処理作業にはある程度の熟練を要する。このため、製造プロセスの効率化や製品の低コスト化を実現することは困難である。

【0007】また、従来のような機械的処理に基づく形状記憶処理によれば、使用目的に対応したアクチュエータの高精密な小型化には限界があると共に、微小形状のSMA薄膜に対する形状記憶処理は極めて困難となる。

10 【0008】更に、かかる機械的処理に基づく形状記憶処理では、熱処理条件の最適化を確保しつつ製品の再現性を一定レベルに維持させることは極めて困難である。この場合、例えば半導体製造プロセス（具体的には、プレーナープロセス）を用いれば、微小形状のSMA薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することは技術的に可能であると考えられる。しかしながら、このような技術は現在提案されていない。

20 【0009】そこで、本発明の目的は、半導体製造プロセスによって、所望形状のSMA薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することが可能な形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明の形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法は、基板の両面に絶縁膜を形成する絶縁膜形成工程と、所定の合金材料から成り且つ所定の内部応力を有する形状記憶合金薄膜を前記基板の表面に形成された前記絶縁膜上に成膜する成膜工程と、前記形状記憶合金薄膜を結晶化させるための結晶化熱処理工程と、前記形状記憶合金薄膜に形状記憶処理を施す形状記憶処理工程と、前記形状記憶合金薄膜を所定形状にパターンニングするパターンニング工程と、前記基板の裏面に形成された前記絶縁膜の一部をエッチング除去する工程と、前記基板の裏面に残留した前記絶縁膜を介して前記基板をエッチングする工程とを有する。

【0011】

【発明の実施の形態】以下、本発明の第1の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図1～図5を参照して説明する。図1には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型アクチュエータの構成が示されている。

【0012】図1に示すように、本実施の形態に適用した片持ち梁型アクチュエータは、支持部14と、この支持部14から延出した形状記憶合金薄膜（以下、SMA薄膜という）から成る略U字状の片持ち梁8とを備えている。なお、SMA薄膜としては、例えばCu系合金やTiNi合金を選択することができるが、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用する。

【0013】片持ち梁8は、支持部14から延出し且つ先端部8aで一体化した2本のビーム8bを備えており、所定方向に可逆的に形状変化するように、二方向の形状記憶効果を有している。この場合、可逆的動作特性の一例として、本実施の形態に適用した片持ち梁8は、室温まで冷却することによって下方又は上方に湾曲し（図1（a），（b）参照）、室温以上に加熱することによって形状記憶した平坦状に回復する（図1（c）参照）。

【0014】図2には、上述したような可逆的動作特性を有する形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造プロセスが示されている。なお、この製造プロセスを介して製造される片持ち梁8は、その一例として、互いに所定の内部応力（例えば、圧縮応力又は引張応力）を有する上層薄膜12及び下層薄膜10から成る2層構造のSMA薄膜となっているものとする。この場合、SMA薄膜を構成する上層薄膜12及び下層薄膜10の内部応力の種類や大きさ等は、適宜選択的に設定することが可能である。また、室温状態において片持ち梁8を予め設定した湾曲状態（図1（a），（b）参照）に変形させることができるように、上層薄膜12及び下層薄膜10は、相互にバイアスパネとしての機能を有している。また、この製造プロセスでは、その一例として、上層薄膜12及び下層薄膜10は、共に、TiNi合金によって形成することとする。

【0015】以下に、形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造プロセスを説明するが、この製造方法によって発明の内容が特定されるものではなく、片持ち梁8の構成として、上層薄膜12及び下層薄膜10のいずれか一方の薄膜を内部応力を有する金属薄膜や絶縁薄膜等で形成しても後述するような効果を奏する。従って、本発明に適用した形状記憶合金薄膜は、SMA薄膜と他の材料から成る薄膜とから成る場合も含めた概念を意味している。

【0016】まず、図2（a）に示すように、（100）の結晶面を有し且つ厚さ300～500 μ m程度のシリコン基板2の両面に厚さ0.4 μ m程度の絶縁膜4，6を形成する（絶縁膜形成工程）。

【0017】なお、これら絶縁膜4，6のうち、片持ち梁8を形成する側の絶縁膜4として、例えば、熱酸化膜又は低応力窒化シリコン膜（低応力Si₃N₄膜）や双方の複合膜を適用することが可能であるが、本実施の形態では、その一例として、柔軟性を有する低応力Si₃N₄膜4を適用する。また、他方の絶縁膜6は、後述する異方性エッチング時のマスクとして用いるため、以下の説明では、この他方の絶縁膜を単にマスク6と称する。

【0018】絶縁膜形成工程終了後、図2（b）に示すように、例えばスパッタリングによって、絶縁膜（低応力Si₃N₄膜）4上にTiNi合金から成る下層薄膜10を厚さ5 μ m程度成膜した後、この下層薄膜10上にT

iNi合金から成る上層薄膜12を厚さ2 μ m程度成膜する（成膜工程）。

【0019】この成膜工程では、上層薄膜12及び下層薄膜10の内部応力（例えば、圧縮応力又は引張応力）や組成を任意に設定することが可能である。例えば、上層薄膜12及び下層薄膜10の内部応力を変化させる方法としては、図3（a）に示すように、成膜時のアルゴンガス圧（以下、Ar圧力という）を変化させる方法が知られている。この場合、Ar圧力を1.0～8.0mtorrまで変化させると、4.5mtorrを境にして、高圧力側で引張応力、低圧力側で圧縮応力が与えられる。なお、図3（a）には、室温状態、供給電力を0.25kW、TiNi合金ターゲットと上層薄膜12（又は下層薄膜10）との間の距離を50mmに夫々設定した場合において、Ar圧力と内部応力との関係が示されている。

【0020】このような現象は、アトムックピーニング効果（atomic peening effect）と呼ばれる現象が反映されたものと言える。アトムックピーニング効果とは、成膜中にTiNi合金ターゲットを叩いたアルゴンガス中のアルゴン原子が、一部中性化して、成膜中の上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面を叩く現象である。

【0021】具体的には、4.5mtorrよりも高いAr圧力の場合、TiNi合金ターゲットから反射したアルゴン原子は、上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面に到達するまでに散乱する確率が高くなる関係上、低いエネルギーのアルゴン原子が成膜中の上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面を叩く。この場合、アルゴン原子によって上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面の原子に与える影響が少なくなるため、内部応力は引張応力となる。これに対して、低いAr圧力の場合、TiNi合金ターゲットから反射したアルゴン原子は、上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面に到達するまでに散乱する確率が低くなる関係上、高いエネルギーを維持した状態で成膜中の上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面を叩く。この場合、アルゴン原子が上層薄膜12（又は下層薄膜10）の内部に入り込むと同時に、アルゴン原子によって上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面の原子が膜内部に押し込まれる。このため、上層薄膜12（又は下層薄膜10）は緻密な膜となり、その内部応力は圧縮応力となる。

【0022】また、内部応力を変化させる他の方法として、例えば、TiNi合金ターゲットと上層薄膜12（又は下層薄膜10）との間の距離を変化させても良い。この場合、距離を長くすると、アルゴン原子が上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面に到達するまでに散乱する確率が高くなるため、内部応力は引張応力となり得る。一方、距離を短くすると、アルゴン原子が上層薄膜12（又は下層薄膜10）の表面に到達するまでに散乱する確率が低くなるため、内部応力は圧縮応力とな

10

20

30

40

50

り得る。

【0023】このような成膜工程において、本実施の形態では、その一例として、上層薄膜12の内部応力が圧縮応力となり且つ下層薄膜10の内部応力が引張応力となり、上層薄膜12及び下層薄膜10が同一組成となった場合を想定する。

【0024】この場合、上記内部応力の変化方法によって圧縮応力を引張応力よりも所望量だけ大きく設定すると、圧縮応力と引張応力との間の相互作用に基づいて、アクチュエータ完成時に室温状態において、片持ち梁8は、図1(a)で示すように、所望量の下向き湾曲形状となり得る。これに対して、圧縮応力を引張応力よりも所望量だけ小さく設定すると、圧縮応力と引張応力との間の相互作用に基づいて、アクチュエータ完成時に室温状態において、片持ち梁8は、図1(b)で示すように、所望量の上向き湾曲形状となり得る。

【0025】以下の製造プロセスでは、その一例として、アクチュエータ完成時に片持ち梁8が、室温状態において、図1(a)で示すような下向き湾曲形状となる場合について説明を加える。

【0026】成膜工程終了後、上層薄膜12及び下層薄膜10には、結晶化させるための熱処理(結晶化熱処理)及び平坦状の形状を記憶させるための熱処理(形状記憶処理)が施される(熱処理工程)。

【0027】この熱処理工程は、通常、上層薄膜12及び下層薄膜10の成膜が終了した後に一括して行われることになる。しかしながら、特に結晶化熱処理は、上記の成膜工程中において、上層薄膜12の成膜前に、下層薄膜10に対して行うことが好ましい。通常、TiNi合金薄膜に対する結晶化熱処理は、480℃以上の高温で行われる。このため、上層薄膜12及び下層薄膜10に一括して結晶化熱処理を施すと、上層薄膜12の内部応力が緩和されてしまう場合があり、この場合、有効にバイアスパネとしての機能を発揮できなくなるおそれがあるからである。従って、高温の熱処理となる結晶化熱処理終了後に上層薄膜12を成膜することが有効な方法と考えられる。

【0028】また、上記同様の理由によって、上記熱処理工程(結晶化熱処理及び形状記憶処理)は、上記の成膜工程中において、上層薄膜12の成膜前に、下層薄膜10に対して行うことが好ましい。通常、TiNi合金薄膜に対する形状記憶処理は、400～500℃の温度で数時間～数十時間に亘って行われるため、上層薄膜12及び下層薄膜10に一括して上記熱処理を施すと、上層薄膜12の内部応力が緩和されてしまう場合があるからである。

【0029】熱処理工程終了後、図2(c)に示すように、フォトリソグラフィによって上層薄膜12及び下層薄膜10を略U字状の片持ち梁形状(図1参照)にパターンニングすると共に、マスク6の一部を除去してシリ

コン基板2を露出させる(フォトリソグラフィ工程)。なお、このフォトリソグラフィ処理は、面方向<110>に沿って行われる。

【0030】続いて、図2(d)に示すように、残留しているマスク6を介してシリコン基板2に異方性エッチング処理を施す。この場合、絶縁膜(低応力SiN膜)4は、異方性エッチング溶液にほとんど溶解しないため、絶縁膜(低応力SiN膜)4が露出した時点でシリコン基板2に対する異方性エッチング処理は自動的に停止する。

【0031】最後に、図2(e)に示すように、ドライエッチング(例えば、反応性イオンエッチング等)によって絶縁膜(低応力SiN膜)4の一部及びマスク6を除去する。この結果、上層薄膜12及び下層薄膜10から成るSMA薄膜製の片持ち梁8と、この片持ち梁8を支持する支持部14とから成る形状記憶合金薄膜アクチュエータが完成する。

【0032】このような製造プロセスによれば、上層薄膜12の圧縮応力が下層薄膜10の引張応力よりも所望量だけ大きく設定されているため、アクチュエータ完成時に室温状態において、片持ち梁8は、図1(a)で示すような下向き湾曲形状を成す。即ち、上層薄膜12及び下層薄膜10から成るTiNi合金製SMA薄膜は、室温状態においてマルテンサイト相(低温相)、或いは、ロンボーヘドラル(Rhombohedral)結晶構造となる。この結果、片持ち梁8は、図1(a)で示すような下向き湾曲形状を成す。

【0033】この状態において、片持ち梁8の基端に形成された一対の電極パッド16(図1参照)に所定の電圧を印加して一対のビーム8bを加熱すると、TiNi合金製SMA薄膜が加熱されることによって、このTiNi合金製SMA薄膜は、オーステナイト相(高温相)に変態する。この結果、TiNi合金製SMA薄膜の形状記憶効果に基づいて、片持ち梁8は、図1(c)に示すような平坦形状に回復する。

【0034】従って、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータによれば、所定周期で電圧印加を繰り返すことによって、片持ち梁8を周期的に揺動させることが可能となる。なお、片持ち梁8の先端部8aを反射ミラーとして兼用することによって、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを光偏向器として用いることが可能である。TiNi合金薄膜は、波長633nmの光に対する反射率が約50%であるため、高い光反射率を確保する場合には、TiNi合金薄膜上にCr製接着層を介してAu層を堆積させることが好ましい。

【0035】このように本実施の形態によれば、所望形状のSMA薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することが可能な形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法を提供することが可能となる。

【0036】上述した例では、上層薄膜12の内部応力が圧縮応力となり且つ下層薄膜10の内部応力が引張応力となった場合について説明したが、上記成膜工程時の内部応力の変化方法によって、例えば、上層薄膜12の内部応力を引張応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を圧縮応力としても上記同様の作用効果を奏する。ただし、この場合には、片持ち梁8は、室温状態において図1(b)に示すような上向き湾曲形状を成し、加熱状態において図1(c)に示すような平坦形状に回復することになる。

【0037】このように上層薄膜12と下層薄膜10の内部応力の組み合わせは、任意に選択することが可能である。例えば、上層薄膜12の内部応力を無応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を圧縮応力又は引張応力としても良い。反対に、上層薄膜12の内部応力を圧縮応力又は引張応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を無応力としても良い。また、上層薄膜12の内部応力を圧縮応力又は引張応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を圧縮応力又は引張応力としても良い。

【0038】特に、上層薄膜12の内部応力を圧縮応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を引張応力とする場合、逆に、上層薄膜12の内部応力を引張応力とし且つ下層薄膜10の内部応力を圧縮応力とする場合、室温状態での片持ち梁8の湾曲量を大きくすることができる。このため、形状記憶合金薄膜アクチュエータの偏向角を大きくすることが可能となる。

【0039】このような内部応力と片持ち梁8の湾曲量即ちたわみ量との間の関係は、以下のストーン・ホフマン(Stoney-Hoffman)の関係式によって表される。なお、この関係式は、その一例として、下層薄膜10を基板とし、上層薄膜12を薄膜として定義されている。

【0040】

$$\sigma = [E b^2 / \{3(1-\nu) L^2 \cdot d\}] \cdot \delta$$

σ ; 薄膜の内部応力

E ; 基板のヤング率

b ; 基板の厚さ

ν ; 基板のポアソン比

L ; 基板の長さ

d ; 薄膜の厚さ

δ ; 片持ち梁の先端部のたわみ量

具体例として、無応力の基板即ち下層薄膜10上に、圧縮応力又は引張応力を有する上層薄膜12を成膜して成る片持ち梁8において、 $E=42\text{ GPa}$ 、 $b=5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $L=5\text{ mm}$ 、 $d=0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\delta=3\text{ mm}$ とすると、上層薄膜12の内部応力 σ は、 $\sigma=120\text{ MPa}$ と算出される。この場合、約 30° の偏向角に対応する。

【0041】また、上記実施の形態では、上層薄膜12及び下層薄膜10を共にTiNi合金で形成したが、例えば、上層薄膜12及び下層薄膜10のいずれか一方の

薄膜をTiNi合金以外の金属で形成しても良い。

【0042】図3(b)には、クロム(Cr)、ステンレススチール(SS)、モリブデン(Mo)、タンタル(Ta)等の種々の金属薄膜の成膜時のアルゴンガス圧と内部応力との関係が示されている。なお、この関係は、ホフマン(D.W.Hoffman)が提唱した文献「Effects of substrate orientation and rotation on internal stresses in sputtered metal films, J.Vac.Sci.Technol., 16(2), 1979, pp.134-137.」に記載されている。

10 【0043】この文献には、TiNi合金のデータは記載されていないが、出願人の実験によれば(図3(a)参照)、TiNi合金薄膜の圧縮応力は、その最大値が -120 MPa であった。なお、成膜の内部応力は、スパッタ条件やスパッタ機種によって相違し、他の機種で成膜したTiNi合金薄膜の最大圧縮応力は、 -240 MPa であった。

【0044】しかしながら、大きな力量のSMA薄膜が要求される場合、例えば、下層薄膜10の厚さを大きくする必要上、上層薄膜12の厚さを大きくしなければならない。

【0045】これに対して、図3(b)に示されているように、圧縮圧力が -1 GPa を越える金属材料が知られており、特に、モリブデン(Mo)の圧縮応力は、 -2 GPa を越える。

【0046】従って、膜厚を増加させること無くパイアスパネとして大きな力を発揮させるためには、モリブデン(Mo)等のTiNi合金以外の金属を用いることが有効であることが分かる。

30 【0047】実際、成膜時のアルゴンガス圧を 2.0 mtorr に設定し且つモリブデントargetを用いて成膜したMo薄膜の内部応力を測定すると、 -640 MPa の大きな圧縮応力を与えることができた。また、タングステン(W) targetを用いて同様の実験を行ったところ、W薄膜に -1.5 GPa の大きな圧縮応力を与えることができた。

【0048】また、上記実施の形態では、上層薄膜12及び下層薄膜10を共にTiNi合金で形成したが、例えば、上層薄膜12及び下層薄膜10のいずれか一方の薄膜を絶縁材料で形成しても良い。

40 【0049】例えば、TiNi合金製下層薄膜10上に所定の引張応力を有する金属製上層薄膜12を成膜する場合、図3(a)、(b)から明らかなように、成膜時のアルゴンガス圧(Ar圧力)を高める必要がある。この場合、上記アトミックピーニング効果によって、成膜中の上層薄膜12に入射するアルゴン原子のエネルギーが小さくなる。このため、成膜後の上層薄膜12は、疎な膜即ち脆い膜となる。しかしながら、SMA薄膜は、アクチュエータとしての機械的運動を伴うため、上層薄膜12には、高い靱性が要求される。

50 【0050】これを満足する材料としては、例えば、L

P-CVD法（減圧化学気相堆積法）によって形成したシリコンナイトライドが好ましい。シリコンナイトライドから成る薄膜（上層薄膜12）を成膜する場合、原料ガスとしては、ジクロールシラン（ SiCl_2H_2 ）とアンモニア（ NH_3 ）が用いられる。特に、通常の組成の Si_3N_4 を得るためには、流量比が $\text{NH}_3/\text{SiCl}_2\text{H}_2 = 5$ 程度の NH_3 過剰の条件で成膜処理が行われる。

【0051】また、 $\text{SiCl}_2\text{H}_2 = 30\text{ sccm}$ 、 $\text{NH}_3 = 150\text{ sccm}$ という条件で成膜した Si_3N_4 の内部応力は、1 GPaを越える引張応力となることが知られている（田畑氏等の文献「薄膜ダイヤフラムを有するマイクロ圧力センサの感度解析、電学論E、116巻4号、平成8年、pp.149-155。」或いは「Mechanical Property Measurements of Thin Films Using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes, Sensors and Actuators, 20 (1989), pp.135-141.」参照）。

【0052】また、シリコンナイトライドから成る薄膜の内部応力を低減する方法としては、 $\text{NH}_3/\text{SiCl}_2\text{H}_2$ の流量比を小さく設定することが効果的であることが知られている（ベック(P.A.Beck)等の文献「LOW STRESS SILICON NITRIDE AND POLYSILICON FILMS FOR MICRO MACHINING APPLICATIONS, Stanford University.」参照）。このように $\text{NH}_3/\text{SiCl}_2\text{H}_2$ の流量比を小さく設定すると、シリコンナイトライドの組成が Si rich 側に変化するため、薄膜の内部応力を低減させることができる。この場合、ポリシリコン（多結晶シリコン）薄膜は、 $-160 \sim -180\text{ MPa}$ の圧縮応力を有するため（上記田畑等の文献参照）、シリコンナイトライドのシリコン含有量を増加させることによって、1 GPaレベルの強い引張応力を緩和させることが可能となる。

【0053】図3(c)には、温度 790°C 、圧力0.3 torr、 $\text{SiCl}_2\text{H}_2 = 30\text{ sccm}$ に固定した状態において、アンモニアガスの流量を150 sccmから3 sccmまで変化させた際の SiN の内部応力の実測値が示されている。図3(c)から明らかなように、流量比が $(\text{NH}_3/\text{SiCl}_2\text{H}_2) < 1$ の領域では、 SiN の引張応力が急速に減少することが分かる。従って、引張応力の制御性が良い点及び SiN から成る薄膜がガラス質であるため機械的柔軟性に富んでいる点を考慮すると、上層薄膜12の材料としては、 SiN が適していると判断される。

【0054】また、上記実施の形態では、上層薄膜12及び下層薄膜10が同一組成となった場合について説明したが、相互に異なる組成で形成しても良い。なお、この場合、上層薄膜12及び下層薄膜10は、共に、TiNi合金から成るSMA薄膜であるものとする。

【0055】具体例として、上層薄膜12は、Ti-55at.%NiからTi-50at.%Niの範囲の組成を有するNi rich な

SMA薄膜となることが好ましく、この場合、下層薄膜10は、Ti-45at.%NiからTi-50at.%Niの範囲の組成を有するTi rich なSMA薄膜となることが好ましい。また、上層薄膜12が、Ti-45at.%NiからTi-50at.%Niの範囲の組成を有するTi rich なSMA薄膜となる場合には、下層薄膜10は、Ti-55at.%NiからTi-50at.%Niの範囲の組成を有するNi rich なSMA薄膜となることが好ましい。

【0056】図4には、Ni rich なSMA薄膜（同図(a)参照）及びTi rich なSMA薄膜（同図(b)参照）の内部応力に起因するたわみ量が夫々示されている。この場合、SMA薄膜は、共に、厚さ $0.4\text{ }\mu\text{m}$ の低応力 SiN で絶縁された Si 基板（厚さ $300\text{ }\mu\text{m}$ 、直径4インチ）上に成膜されているものとする。なお、同図(a)に示された薄膜の成膜条件は、Ar圧力が2.2 mtorr、印加電圧が0.33 kV、印加電流が0.85 Aであり、一方、同図(b)に示された薄膜の成膜条件は、Ar圧力が2.5 mtorr、印加電圧が0.35 kV、印加電流が0.85 Aである。

【0057】また、図4(a)、(b)において、符号18で示す特性曲線は、成膜前の Si 基板自体の初期のたわみ量（“初期たわみ量”という）の変化を示し、符号20で示す特性曲線は、成膜後の Si 基板自体のたわみ量（“後期たわみ量”という）の変化を示し、符号22で示す特性曲線は、後期たわみ量から初期たわみ量を差し引いた量即ち成膜したSMA薄膜の内部応力に起因した Si 基板の正味のたわみ量（“正味たわみ量”という）を示している。

【0058】この正味たわみ量22に基づいてSMA薄膜の内部応力を計算する場合、以下のストーンニ(Stoney)の式が用いられる。

$$\sigma = \{E / (1 - \nu) h^2\} / 6 R t$$

σ ; 薄膜の内部応力

E ; Si 基板のヤング率

ν ; Si 基板のポアソン比

h ; Si 基板の厚さ

R ; Si 基板の曲率半径

t ; 膜厚

図4(a)に示された正味たわみ量22が上に凸状となっていることから、成膜されたSMA薄膜の内部応力は、圧縮応力となり、その値 σ は、上記ストーンニの式から $\sigma = -50.2\text{ MPa}$ となる。

【0059】これに対して、図4(b)に示された正味たわみ量22が上に凹状となっていることから、成膜されたSMA薄膜の内部応力は、引張応力となり、その値 σ は、上記ストーンニの式から $\sigma = 143.8\text{ MPa}$ となる。

【0060】このように組成の異なる薄膜を積層することによっても、SMA薄膜に圧縮応力又は引張応力を与えることができる。この結果、上記実施の形態と同様

に、室温状態で上方又は下方に湾曲（図1（a）,

（b）参照）させ、室温以上に加熱することによって形状記憶した平坦状に回復（図1（c）参照）させることが可能な二方向の形状記憶効果を有する形状記憶合金薄膜アクチュエータを実現することができる。

【0061】また、上記実施の形態では、上層薄膜12及び下層薄膜10から成る2層構造のSMA薄膜を有する片持ち梁8を適用しているが、図5に示すように、単一の層から成り且つその厚さT方向に応力分布を与えたSMA薄膜を用いても良い。

【0062】なお、同図（a）,（f）には、夫々、SMA薄膜の断面が示されており、同図（b）,（c）,（d）,（e）には、夫々、SMA薄膜の厚さT方向に沿って段階的に内部応力を変化させた状態が示されており、同図（g）,（h）,（i）,（j）には、夫々、SMA薄膜の厚さT方向に沿って連続的に内部応力を変化させた状態が示されている。

【0063】図5（b）,（g）に示すように、単一のSMA薄膜から成る片持ち梁8の上側から下側に向かって圧縮応力を段階的（同図（b）参照）又は連続的（同図（g）参照）に減少させた場合、シリコン基板2上に絶縁膜4を介して形成した片持ち梁8は、室温状態で下向き湾曲形状を成す（同図（k）参照）。

【0064】図5（c）,（h）に示すように、SMA薄膜の上側から下側に向かって引張応力を段階的（同図（c）参照）又は連続的（同図（h）参照）に減少させた場合、片持ち梁8は、室温状態で上向き湾曲形状を成す（同図（l）参照）。

【0065】図5（d）,（i）に示すように、SMA薄膜の上側から下側に向かって引張応力を段階的（同図（d）参照）又は連続的（同図（i）参照）に増加させた場合、片持ち梁8は、室温状態で下向き湾曲形状を成す（同図（m）参照）。

【0066】図5（e）,（j）に示すように、SMA薄膜の上側から下側に向かって圧縮応力を段階的（同図（e）参照）又は連続的（同図（j）参照）に増加させた場合、片持ち梁8は、室温状態で上向き湾曲形状を成す（同図（n）参照）。

【0067】このようにSMA薄膜自体に応力分布を与えることによって、積層膜相互の内部応力作用（上記実施の形態参照）を用いることなく、室温状態でSMA薄膜を湾曲させ、加熱することによってSMA薄膜を形状記憶された平坦状に回復させることができる。

【0068】次に、本発明の第2の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図6を参照して説明する。図6には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した両持ち梁型アクチュエータの構成が示されている。

【0069】図6に示すように、本実施の形態に適用した両持ち梁型アクチュエータは、支持部24と、その両

端が支持部24に支持された二方向性SMA薄膜から成る略長方形の両持ち梁26とを備えている。なお、SMA薄膜としては、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用する。

【0070】支持部24は、第1の実施の形態と同様に、シリコン基板28上に絶縁膜30を成膜して構成されており、その中央部分には、シリコン基板28から絶縁膜30を貫通して形成された矩形状の開口32が設けられている。なお、絶縁膜30としては、例えば、熱酸化膜又は低応力窒化シリコン膜（低応力SiN膜）や双方の複合膜を適用することが可能であるが、本実施の形態では、その一例として、柔軟性を有する低応力SiN膜30を適用する。

【0071】両持ち梁26は、支持部24の開口32を横断して設けられており、その両端は、絶縁膜（低応力SiN膜）30上に支持されている。このような構成を有する両持ち梁型アクチュエータは、第1の実施の形態と略同様の製造プロセスによって製造される。

【0072】具体的には、シリコン基板28上に絶縁膜（低応力SiN膜）30を成膜した後、SMA薄膜を成膜する際に所定の内部応力（例えば、圧縮応力又は引張応力）が設定される。なお、本実施の形態では、SMA薄膜から成る両持ち梁26に圧縮応力が与えられた場合について説明する。この後、SMA薄膜には、結晶化させるための熱処理（結晶化熱処理）及び平坦状に形状記憶するための熱処理（形状記憶処理）が施される。次に、フォトリソグラフィによってSMA薄膜を略長方形の両持ち梁形状にパターンニングする。続いて、図示しないマスクを介してシリコン基板28に異方性エッチングを施した後、絶縁膜（低応力SiN膜）30にドライエッチング（例えば、反応性イオンエッチング（RIE））を施す。この結果、支持部24の中央部分に矩形状の開口32が形成され、同時に、この開口32を横断して支持された両持ち梁26を備えたアクチュエータが完成する。

【0073】このような製造プロセスによれば、SMA薄膜に圧縮応力が設定されているため、アクチュエータ完成時に室温状態において、両持ち梁26は、図6

（a）に示すように、上向きアーチ形状を成す。

【0074】この状態において、両持ち梁26の両端に形成された一対の電極パッド34に所定の電圧を印加してSMA薄膜を加熱すると、このTiNi合金製SMA薄膜は、オーステナイト相（高温相）に変態する。この結果、TiNi合金製SMA薄膜の形状記憶効果に基づいて、両持ち梁26は、図6（b）に示すような平坦形状に回復する。

【0075】従って、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータによれば、所定周期で電圧印加を繰り返すことによって、両持ち梁26を周期的に変形させることが可能となる。なお、両持ち梁26の略中央部分を反

射ミラーとして兼用することによって、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを光偏向器として用いることが可能である。具体的には、図6(c)に示すように、半導体レーザ36からの照射位置を変化させることによって、入射光と反射光の成す角即ち偏向角を θ_1 又は θ_2 ($\theta_1 < \theta_2$)に変化させることができる。なお、TiNi合金製SMA薄膜は、波長633nmの光に対する反射率が約50%であるため、高い光反射率を確保する場合には、SMA薄膜上にCr製接着層を介してAu層を堆積させることが好ましい。

【0076】次に、本発明の第3の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図7及び図8を参照して説明する。図7及び図8には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したダイヤフラム型アクチュエータの構成が示されている。

【0077】図7及び図8に示すように、本実施の形態に適用したダイヤフラム型アクチュエータは、支持部38と、その周縁部が支持部38に支持された二方向性SMA薄膜から成る矩形状のダイヤフラム40とを備えている。なお、SMA薄膜としては、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用する。

【0078】支持部38は、第1の実施の形態と同様に、シリコン基板42上に絶縁膜44を成膜して構成されており、その中央部分には、シリコン基板42から絶縁膜44を貫通して形成された円筒形状の開口46が設けられている。なお、絶縁膜44としては、例えば、熱酸化膜又は低応力窒化シリコン膜（低応力SiN膜）や双方の複合膜を適用することが可能であるが、本実施の形態では、その一例として、柔軟性を有する低応力SiN膜を適用する。

【0079】ダイヤフラム40は、支持部38の開口46を覆うように配設されており、その周縁部は、絶縁膜（低応力SiN膜）44上に支持されている。このような構成を有する両持ち梁型アクチュエータは、第1の実施の形態と略同様の製造プロセスによって製造される。

【0080】具体的には、シリコン基板42上に絶縁膜（低応力SiN膜）44を成膜した後、SMA薄膜を成膜する際に所定の内部応力（例えば、圧縮応力又は引張応力）が設定される。なお、本実施の形態では、SMA薄膜から成るダイヤフラム40に圧縮応力が与えられた場合について説明する。この後、SMA薄膜には、結晶化させるための熱処理（結晶化熱処理）及び平坦状に形状記憶するための熱処理（形状記憶処理）が施される。次に、フォトリソグラフィによってSMA薄膜を矩形状のダイヤフラム形状にパターニングする。続いて、図示しないマスクを介してシリコン基板42に誘導結合型プラズマ（ICP）エッチングを施した後、絶縁膜（低応力SiN膜）44にドライエッチング（例えば、反応性イオンエッチング(RIE)）を施す。なお、ICPエッチ

ング法では、絶縁膜（低応力SiN膜）44のエッチング速度に比べて、シリコン基板42のエッチング速度が約100倍大きくなるため、例えば厚さ200 μ mのシリコン基板42上に厚さ2 μ mの絶縁膜（低応力SiN膜）44を積層しておけば、シリコン基板42から絶縁膜（低応力SiN膜）44を貫通して円筒形状の開口46が形成されることになる。この結果、支持部38の中央部分に円筒形状の開口46が形成され、同時に、この開口46を覆うように支持されたダイヤフラム40を備えたアクチュエータが完成する。

【0081】このような製造プロセスによれば、SMA薄膜に圧縮応力が設定されているため、アクチュエータ完成時に室温状態において、ダイヤフラム40は、上向きドーム形状を成す（図7(a), (b)参照）。

【0082】この状態において、ダイヤフラムに形成された電極パッド部（図示しない）に所定の電圧を印加してSMA薄膜を加熱すると、このTiNi合金製SMA薄膜は、オーステナイト相（高温相）に変態する。この結果、TiNi合金製SMA薄膜の形状記憶効果に基づいて、ダイヤフラム40は、図7(c), (d)に示すような平坦形状に回復する。

【0083】従って、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータによれば、所定周期で電圧印加を繰り返すことによって、ダイヤフラム40を周期的に変形させることが可能となる。

【0084】なお、ダイヤフラム40のドーム表面を反射ミラーとして兼用することによって、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを光偏向器として用いることが可能である。具体的には、図8(a)に示すように、半導体レーザ48からの照射位置を変化させることによって、入射光と反射光の成す角即ち偏向角を変化させることができる。この場合、半導体レーザ48からのレーザー光をダイヤフラム40のドーム頂上位置に照射した場合には、ダイヤフラム40を変形させても光偏向は生じない。これに対して、レーザー光をドーム傾斜位置に照射すれば、偏向角 θ を有する光偏向が生じる（図8(a)参照）。また、この状態において、同図(a)に示すように、半導体レーザ48を矢印方向に円状に移動してレーザー光の照射位置を変化させると、ダイヤフラム40からの反射光は、矢印Sで示す軌跡を描くように二次元光偏向される。

【0085】また、図7(b)に示すように、ダイヤフラム40のドーム裏面を可焦点ミラーとして兼用することも可能である。この場合、ドーム裏面に平行光束を照射した際にドーム裏面から反射した反射光の焦点位置Pは、ドーム形状の曲率半径によって決定される。従って、SMA薄膜の加熱温度を変化することによって、焦点位置Pを任意に設定することが可能となる。

【0086】なお、図7(a), (b)の場合において、TiNi合金製SMA薄膜は、波長633nmの光

10

20

30

40

50

に対する反射率が約50%であるため、高い光反射率を確保する場合には、SMA薄膜上にCr製接着層を介してAu層を堆積させることが好ましい。

【0087】次に、本発明の第4の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図9及び図10を参照して説明する。図9及び図10には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したマイクロポンプの構成が示されている。

【0088】図9及び図10に示すように、本実施の形態に適用したマイクロポンプは、その長手軸方向に沿って一定間隔で複数の開口50が形成された支持部52と、複数の開口50を覆うように設けられ且つその周縁部が支持部52に支持された二方向性SMA薄膜から成る矩形状の複数のダイヤフラム54a、54b、54cと、支持部52から一定距離だけ離間し且つダイヤフラム54a、54b、54cに対向して配置された上板56とを備えている。

【0089】このような構成を有するマイクロポンプによれば、支持部52と上板56との間には、流体58が通過可能な流路60が形成され、ダイヤフラム54a、54b、54cを所定タイミングで変形させることによって、流路60に沿って流体58を送り出すことができる。

【0090】なお、SMA薄膜としては、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用する。また、本実施の形態では、その一例として、3つの開口50上に夫々設けられた3つのダイヤフラム54a、54b、54cを備えたマイクロポンプについて説明する。従って、以下の説明において、これら3つのダイヤフラムを第1のダイヤフラム54a、第2のダイヤフラム54b、第3のダイヤフラム54cと称することとする。また、図面上、流体58は、斜めハッチングによって示されている。

【0091】支持部52は、第1の実施の形態と同様に、シリコン基板62上に絶縁膜64を成膜して構成されており、その中央部分には、シリコン基板62から絶縁膜64を貫通して形成された所定形状の開口50が長手軸方向に沿って一定間隔で設けられている。なお、これら開口50の形状としては、例えば円形や矩形等の種々の形状が可能であるが、本実施の形態では、その一例として、円形の開口50を適用する(図10(a)参照)。また、絶縁膜64としては、例えば、熱酸化膜又は低応力窒化シリコン膜(低応力SiN膜)や双方の複合膜を適用することが可能であるが、本実施の形態では、その一例として、柔軟性を有する低応力SiN膜64を適用する。

【0092】第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cは、夫々、円形の開口50を覆うように配設されており、その周縁部は、絶縁膜(低応力SiN膜)64上に支持されている。

【0093】このような構成を有するマイクロポンプに適用された形状記憶合金薄膜アクチュエータは、第1の実施の形態と略同様の製造プロセスによって製造される。従って、相違する製造プロセスについてのみ説明を加える。即ち、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cの製造プロセスは、SMA薄膜66上に柔軟性絶縁薄膜(図示しない)を成膜した後、この絶縁薄膜上に金属製薄膜ヒータ68を一体的にパターンニングする(図10(b)参照)。本実施の形態では、SMA薄膜66から成る第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cに圧縮応力が与えられた場合について説明する。なお、SMA薄膜66上に圧縮応力を有する柔軟性薄膜(図示しない)を積層しても良い。

【0094】このような製造プロセスによれば、SMA薄膜66に圧縮応力が設定されているため、マイクロポンプ完成時に室温状態において、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cは、流路60を閉塞するように上向きドーム形状を成す(図9(a)参照)。

【0095】この状態において、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cに夫々形成された電極パッド部70(図10(b)参照)に所定の電圧を印加してSMA薄膜66を間接的に加熱すると、TiNi合金製のSMA薄膜66は、オーステナイト相(高温相)に変態する。この結果、SMA薄膜66の形状記憶効果に基づいて、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cは、流路60を開放するように平坦形状に回復する(図9(b)～(f)参照)。

【0096】従って、本実施の形態に適用したマイクロポンプによれば、対応する電極パッド部70に電圧印加を繰り返すことによって、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cを周期的且つ選択的に変形させることが可能となる。

【0097】以下、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータが適用されたマイクロポンプの動作について説明する。室温状態において、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cは、上向きドーム形状を成し、流路60を閉塞する。この場合、所定の圧力で送り出された流体58は、第1のダイヤフラム54aの部分まで充填される(図9(a)参照)。

【0098】このとき、第1のダイヤフラム54aのSMA薄膜66(図10(a)参照)を加熱すると、第1のダイヤフラム54aは、その形状記憶効果に基づいて平坦形状に回復する。この結果、流体58は、流路60に沿って、第2のダイヤフラム54bまで送り出される(図9(b)参照)。

【0099】続いて、第1のダイヤフラム54aを平坦形状に維持させた状態において、第2のダイヤフラム54bのSMA薄膜66を加熱すると、第2のダイヤフラム54bは、その形状記憶効果に基づいて平坦形状に回復する。この結果、流体58は、流路60に沿って、第3

のダイヤフラム54cまで送り出される(図9(c)参照)。

【0100】次に、第2のダイヤフラム54bを平坦形状に維持させた状態において、第1のダイヤフラム54aのSMA薄膜66に対する加熱を停止して、第1のダイヤフラム54aを空冷する。この場合、室温状態まで空冷された第1のダイヤフラム54aは、上向きドーム形状を成し、流路60を閉塞する。この結果、流体58は、第1及び第3のダイヤフラム54a、54cの間の流路60内に充填された状態に維持される(図9(d)参照)。

【0101】この後、第1のダイヤフラム54aをドーム形状に、且つ、第2のダイヤフラム54bを平坦形状に維持させた状態において、第3のダイヤフラム54cのSMA薄膜66を加熱すると、第3のダイヤフラム54cは、その形状記憶効果に基づいて平坦形状に回復する。この結果、流体58は、流路60に沿って、第3のダイヤフラム54cを越えて送り出される(図9(e)参照)。

【0102】次に、第3のダイヤフラム54cを平坦形状に維持させた状態において、第2のダイヤフラム54bのSMA薄膜66に対する加熱を停止して、第2のダイヤフラム54bを空冷する。この場合、室温状態まで空冷された第2のダイヤフラム54bは、上向きドーム形状を成し、流路60を閉塞する。この結果、流体58は、流路60から外方へ所定圧力で送り出される(図9(f)参照)。

【0103】続いて、第3のダイヤフラム54cのSMA薄膜66に対する加熱を停止して、第3のダイヤフラム54cを空冷する。この場合、室温状態まで空冷された第3のダイヤフラム54cは、上向きドーム形状を成し、流路60を閉塞する。この結果、流体58は、流路60から外方へ所定圧力で更に送り出される(図9(g)参照)。

【0104】このように、第1～第3のダイヤフラム54a、54b、54cに一体形成された薄膜ヒータ68(図10(b)参照)を選択的に駆動することによって、流路60に沿って流体58を所望の方向へ送り出すことができる。

【0105】ところで、SMA薄膜から成るアクチュエータを駆動する場合、通常、SMA薄膜に直接通電して、SMA薄膜66から発生するジュール熱によって、SMA薄膜の温度を上昇させる方法が一般的に用いられている。

【0106】しかしながら、SMA薄膜は、金属材料から形成されているため、SMA薄膜中の電気抵抗は、極めて小さい。このため、形状記憶効果に基づいてSMA薄膜を形状回復させる温度まで加熱するためには、SMA薄膜に大きな電流を流す必要があり、現実的ではない。

【0107】そこで、本実施の形態のように、柔軟性絶縁薄膜(図示しない)を介してSMA薄膜66上に金属製薄膜ヒータ68をパターンニングすることが好ましい。アクチュエータとして機能させることが可能なSMA薄膜66は、その用途にも依るが、数 μm ～数十 μm 程度の膜厚が必要である。これに対して、薄膜ヒータ68の膜厚は、SMA薄膜66の膜厚とは無関係に任意に選択できるため、簡単に高抵抗化させることが可能となる。例えば、膜厚0.2 μm のTi薄膜を用いた場合、幅120 μm で長さ5mmの薄膜ヒータ68の電気抵抗は、約200オームであった。従って、本実施の形態のように、柔軟性絶縁薄膜を介してSMA薄膜66を間接的に加熱すれば、低電流でSMA薄膜66を形状回復する温度まで簡単に加熱することが可能となる。

【0108】次に、本発明の第5の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図11及び図12を参照して説明する。図11には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型二次元光偏向器の構成が示されている。

【0109】図11に示すように、本実施の形態に適用した二次元光偏向器は、支持部72と、この支持部72から延出したSMA薄膜から成る略U字状の片持ち梁74とを備えており、片持ち梁74には、この片持ち梁74に捩じれモーメントを与えるためのモーメント部材76が一体的に設けられている。なお、SMA薄膜としては、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用する。

【0110】片持ち梁74は、支持部72から延出し且つ先端部74aで一体化した2本のビーム74bを備えており、所定方向に可逆的に形状変化するように二方向の形状記憶効果を有している。この場合、可逆的動作特性の一例として、本実施の形態に適用した片持ち梁74は、室温まで冷却することによって図中X方向に湾曲し(図11(b)参照)、室温以上に加熱することによって形状記憶した平坦状に回復する(図11(c)参照)。なお、片持ち梁74の先端部74aは、二次元光偏向器の反射ミラー部として兼用される。

【0111】モーメント部材76は、片持ち梁74と同一のSMA薄膜によって一体形成されており、図中Y方向の捩じれモーメントを片持ち梁74に与えるように、モーメント部材76と片持ち梁74とを接続する接続部78は、片持ち梁74の中心線D(図11(a)参照)からずらして配置されている。

【0112】このような二次元光偏向器の製造プロセスは、フォトリソグラフィによってモーメント部材76及び接続部78をパターンニングする工程が加えられる点を除いて、第1の実施の形態と略同様であるため、その説明は省略する。なお、モーメント部材76は、片持ち梁74の完成後に別途加工プロセスを施すことによって、片持ち梁74に取り付けても良い。

【0113】このような製造プロセスでは、SMA薄膜に引張応力が設定されている状態を想定している。このため、二次元光偏向器の完成時に室温状態において、片持ち梁74は、モーメント部材76のモーメント力が作用することによって、先端部74aが振じれた上向き湾曲形状に変形する(図11(b)参照)。

【0114】この状態において、片持ち梁74の両端に形成された一対の電極パッド80に所定の電圧を印加してSMA薄膜を加熱すると、このSMA薄膜は、オーステナイト相(高温相)に変態する。この結果、SMA薄膜の形状記憶効果に基づいて、片持ち梁74は、図11(c)に示すような平坦形状に回復する。

【0115】従って、本実施の形態を適用した二次元光偏向器によれば、所定周期で電圧印加を繰り返すことによって、片持ち梁74を周期的に変形させることが可能となる。

【0116】具体的には、所定の周期で電圧を印加して、片持ち梁74の共振周波数に基づいて片持ち梁74を振動させることによって、片持ち梁74の先端部74a即ち反射ミラー部74aは、X方向に振動すると同時に、この反射ミラー部74aには、モーメント部材76のY方向のモーメント力が加えられる。この場合、反射ミラー部74aは、X方向及びY方向の2つの振動モードが加算されたモードで振動する。従って、振じれ振動している反射ミラー部74aに光を入射させた場合、反射ミラー部74aから反射した反射光は、二次元方向に偏向することになる。なお、TiNi合金製SMA薄膜は、波長633nmの光に対する反射率が約50%であるため、高い光反射率を確保する場合には、SMA薄膜上にCr製接着層を介してAu層を堆積させることが好ましい。

【0117】また、図12に示すように、片持ち梁74を駆動制御するための駆動回路82及び制御回路84を片持ち梁74と共に支持部72上に一体的に形成することも好ましい。この場合、駆動回路82と片持ち梁74の一対の電極パッド80とは、接続ワイヤ86によって電気的に接続されている。このような構成によれば、上記実施の形態と同様の作用効果を奏すると共に、支持部72上に駆動回路82及び制御回路84を一体形成することができるため、極めてコンパクトな二次元偏向器を実現することが可能となる。

【0118】次に、本発明の第6の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図13を参照して説明する。図13には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型光偏向器の構成が示されている。

【0119】図13に示すように、本実施の形態に適用した光偏向器は、支持部88と、この支持部88から延出したSMA薄膜から成る略U字状の片持ち梁90とを備えている。なお、SMA薄膜としては、本実施の形態

では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜を適用し、このSMA薄膜には、第1の実施の形態と同様の製造プロセスを用いて、平坦形状に形状記憶処理が施されている。

【0120】本実施の形態では、支持部88として、誘電体結晶から成るZカット水晶基板が用いられている。片持ち梁90は、支持部(Zカット水晶基板)88から延出し且つ先端部90aで一体化した2本のビーム90bを有しており、これらビーム90b上に所定の内部応力を有するポリシリコン薄膜92が夫々積層されている。なお、このような構成において、支持部(Zカット水晶基板)88は誘電体であるため、この支持部(Zカット水晶基板)88とTiNi合金製片持ち梁90とは、電気的に絶縁された状態になってる。また、片持ち梁90の先端部90aは、光偏向器の反射部として兼用される。

【0121】次に、このような光偏向器の製造プロセスを簡単に説明する。Zカット水晶基板88上にスパッタ法でTiNi合金からなるSMA薄膜を堆積した後、フォトリソグラフィーによってSMA薄膜を片持ち梁形状にパターニングする。続いて、このSMA薄膜に対して平坦形状の形状記憶処理を施す。この後、片持ち梁90の2つのビーム90b上に所定の内部応力を有するポリシリコン薄膜92を積層する。次に、Zカット水晶基板88にCr製接着層(図示しない)を介して積層されたAu製マスク94を用いて、Zカット水晶基板88に異方性エッチングを施す。この結果、支持部(Zカット水晶基板)88に支持された片持ち梁90を有する光偏向器が完成する。

【0122】このような製造プロセスに用いたポリシリコン薄膜92は、 -160MPa の圧縮応力を有することが知られている(上記田畑修他文献参照)。従って、Zカット水晶基板88に異方性エッチングが施された後、室温状態において、片持ち梁90は、図13

(b)に示すように、ポリシリコン薄膜92の圧縮応力によって、下向き湾曲形状を成す。なお、温度 82°C の NH_4-HF_2 混合液中において、Zカット水晶基板88には、容易に且つ精度良く垂直方向に異方性エッチングが可能であることは既に知られている(Naoki Sugiyama, et al., A QUARTZ GALVANOMETER FOR OPTICAL SCANNING IN A LASER PRINTING APPLICATION, Tech. digest. 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducer'91), 1991, pp. 734-737.)。

【0123】この状態において、片持ち梁90の基端に形成された一対の電極パッド96に所定の電圧を印加してSMA薄膜を加熱すると、このSMA薄膜は、オーステナイト相(高温相)に変態する。この結果、SMA薄膜の形状記憶効果に基づいて、片持ち梁90は、図13(c)に示すような平坦形状に回復する。

【0124】従って、本実施の形態を適用した光偏向器

によれば、所定周期で電圧印加を繰り返すことによって片持ち梁90を周期的に変形させることが可能となる。この場合、先端部（反射部）90aにレーザー光を照射することによって、この反射部90aからの反射光を片持ち梁90の撓み角に基づいて垂直平面内に走査させることができる。なお、TiNi合金製SMA薄膜は、波長633nmの光に対する反射率が約50%であるため、高い光反射率を確保する場合には、SMA薄膜上にCr製接着層を介してAu層を堆積させることが好ましい。

【0125】次に、本発明の第7の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータについて、図14を参照して説明する。図14には、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したダイヤフラム型点字表示素子の構成が示されている。

【0126】図14に示すように、本実施の形態に適用したダイヤフラム型点字表示素子は、シリコン基板98から成る支持部100を備えており、この支持部100上には、絶縁膜102を介して二方向性SMA薄膜104及び圧縮応力を有する応力薄膜106が順に成膜されている。なお、SMA薄膜104としては、本実施の形態では、その一例として、TiNi合金から成るSMA薄膜104を適用し、第1の実施の形態と同様の製造プロセスによって平坦状に形状記憶処理が施されている。

【0127】支持部100を構成するシリコン基板98には、縦横方向に沿って所定間隔で形成された所定寸法を有する複数の開口108が設けられており、これら開口108は、夫々、絶縁膜102が露出するまでシリコン基板98にエッチング（例えば、異方性エッチング又はドライエッチング）を施して形成されている。なお、絶縁膜102としては、例えば、熱酸化膜又は低応力窒化シリコン膜（低応力SiN膜）や双方の複合膜を適用することが可能であるが、本実施の形態では、その一例として、柔軟性を有する低応力SiN膜を適用する。

【0128】絶縁膜（低応力SiN膜）102、SMA薄膜104及び応力薄膜106は、共に、複数の開口108を覆うように支持部100上に支持されており、SMA薄膜104には、このSMA薄膜104を加熱及び冷却するための薄膜ヒータ（図示しない）が一体的にパターンニングされている。

【0129】このように構成されたダイヤフラム型点字表示素子には、その縦横方向に沿って所定間隔で形成された複数のダイヤフラム110が形成される。具体的に、1つのダイヤフラム110を例にとって説明すると（図14（a）、（b）参照）、開口108上に形成されたダイヤフラム110は、室温状態において、応力薄膜106の作用によって上向きドーム形状を成す（同図（b）参照）。そして、SMA薄膜104に一体形成された薄膜ヒータによってSMA薄膜104を加熱すると、このTiNi合金製SMA薄膜104は、オーステ

ナイト相（高温相）に変態する。この結果、TiNi合金製SMA薄膜104の形状記憶効果に基づいて、ダイヤフラム110は、同図（a）に示すような平坦形状に回復する。

【0130】本実施の形態に適用したダイヤフラム型点字表示素子によれば、複数のダイヤフラム110に対して選択的に電圧印加を繰り返すことによって、図14（c）、（d）に示すように、複数のダイヤフラム110を点字パターンに対応して変形させることが可能となる。従って、点字パターンを文字や文章に従って変化させることによって、ダイヤフラム型点字表示素子の上に指等を軽く乗せるだけで且つ指等を移動させることなく、指等を介して点字パターンに対応した文字や文章を認識することが可能となる。

【0131】なお、本明細書中には、以下の発明が含まれる。

(1) 基板の両面に絶縁膜を形成する絶縁膜形成工程と、所定の合金材料から成り且つ所定の内部応力を有する形状記憶合金薄膜を前記基板の表面に形成された前記絶縁膜上に成膜する成膜工程と、前記形状記憶合金薄膜を結晶化させるための結晶化熱処理工程と、前記形状記憶合金薄膜に形状記憶処理を施す形状記憶処理工程と、前記形状記憶合金薄膜を所定形状にパターンニングするパターンニング工程と、前記基板の裏面に形成された前記絶縁膜の一部をエッチング除去する工程と、前記基板の裏面に残留した前記絶縁膜を介して前記基板をエッチングする工程とを有することを特徴とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法。

(2) 前記形状記憶処理工程において、前記形状記憶合金薄膜には、平坦状の形状を記憶させることを特徴とする上記（1）に記載の製造方法。

(3) 前記パターンニング工程において、前記形状記憶合金薄膜は、フォトリソグラフィによって、所定形状にパターンニングされることを特徴とする上記（1）に記載の製造方法。

（構成）（1）～（3）の発明は、全ての実施の形態に適用され得る。

（作用効果）この発明によれば、半導体製造プロセスによって、所望形状のSMA薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することが可能な形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法を提供することができる。

(4) 前記形状記憶合金薄膜は、所定の組成を有する上層薄膜及び下層薄膜から成り、前記成膜工程において、任意の内部応力を有する前記上層薄膜及び前記下層薄膜が前記絶縁膜上に成膜されることを特徴とする上記（1）に記載の製造方法。

（構成）この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態（図1及び図2参照）に具体的な構成が示されている。

(作用効果) この発明によれば、互いに所定の内部応力 (例えば、圧縮応力又は引張応力) を有する上層薄膜及び下層薄膜から成る2層構造の形状記憶合金薄膜 (以下、SMA薄膜) となり、これら上層薄膜及び下層薄膜は、室温状態においてSMA薄膜を予め設定した湾曲状態 (図1 (a), (b) 参照) に変形させるためのバイアスバネとして相互に機能する。

(5) 前記成膜工程において、前記上層薄膜及び前記下層薄膜には、圧縮応力及び引張応力が選択的に設定されることを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態 (図1及び図2参照) に具体的な構成が示されている。

(作用効果) この発明によれば、圧縮応力又は引張応力が選択的に設定された上層薄膜及び下層薄膜から成る2層構造の形状記憶合金薄膜 (以下、SMA薄膜) となり、このSMA薄膜は、圧縮応力と引張応力との間の相互作用に基づいて、室温状態において、予め設定した湾曲状態 (図1 (a), (b) 参照) と成り得る。

(6) 前記結晶化熱処理工程は、前記成膜工程中において、前記上層薄膜の成膜前に、前記下層薄膜に対して行うことを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態 (図1及び図2参照) に具体的な構成が示されている。

(作用効果) 通常、TiNi合金薄膜に対する結晶化熱処理は、480℃以上の高温で行われる。このため、上層薄膜及び下層薄膜に一括して結晶化熱処理を施すと、上層薄膜の内部応力が緩和されてしまう場合があり、この場合、有効にバイアスバネとしての機能を発揮できなくなるおそれがあるからである。従って、高温の熱処理となる結晶化熱処理終了後に上層薄膜を成膜することが有効な方法と考えられる。

(7) 前記結晶化熱処理工程及び前記形状記憶処理工程は、前記成膜工程中において、前記上層薄膜の成膜前に、前記下層薄膜に対して行うことを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態 (図1及び図2参照) に具体的な構成が示されている。

(作用効果) 通常、TiNi合金薄膜に対する形状記憶処理は、400～500℃の温度で数時間～数十時間に亘って行われるため、上層薄膜12及び下層薄膜10に一括して上記熱処理を施すと、上層薄膜12の内部応力が緩和されてしまう場合がある。従って、高温の熱処理となる結晶化熱処理及形状記憶処理終了後に上層薄膜12を成膜することが有効な方法と考えられる。

(8) 前記上層薄膜及び前記下層薄膜のいずれか一方の薄膜を形状記憶合金 (TiNi合金又はCu合金) で成膜し、他方の薄膜を内部応力を有する形状記憶合金以外

の合金材料で成膜することを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能である。

(作用効果) 内部応力を有する形状記憶合金以外の合金材料としては、使用目的に応じてクロム (Cr)、ステンレススチール (SS)、モリブデン (Mo)、タンタル (Ta) 等の種々の金属 (図3 (b) 参照) を適用することが可能である。

(9) 前記上層薄膜及び前記下層薄膜のいずれか一方の薄膜を形状記憶合金 (TiNi合金又はCu合金) で成膜し、他方の薄膜を内部応力を有する絶縁材料で成膜することを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能である。

(作用効果) 絶縁材料としては、例えば、シリコンナイトライドを適用することが可能である。

(10) 前記上層薄膜は、Ti-55at. %NiからTi-50at. %Niの範囲のNi richな組成を有し、前記下層薄膜は、Ti-45at. %NiからTi-50at. %Niの範囲のTi richな組成を有することを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(11) 前記上層薄膜は、Ti-45at. %NiからTi-50at. %Niの範囲のTi richな組成を有し、前記下層薄膜は、Ti-55at. %NiからTi-50at. %Niの範囲のNi richな組成を有することを特徴とする上記 (4) に記載の製造方法。

(構成) (10), (11) の発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態 (図4参照) に具体例が示されている。

(作用効果) このように組成の異なる薄膜を積層することによっても、SMA薄膜に圧縮応力又は引張応力を与えることができる (図4参照)。この結果、上記実施の形態と同様に、室温状態で上方又は下方に湾曲 (図1 (a), (b) 参照) させ、室温以上に加熱することによって形状記憶した平坦状に回復 (図1 (c) 参照) させることが可能な二方向形状記憶合金薄膜アクチュエータを実現することができる。

(12) 前記成膜工程において、成膜時のアルゴンガス圧を変化させることによって、前記形状記憶合金薄膜の内部応力が設定されることを特徴とする上記 (1) に記載の製造方法。

(構成) この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態 (図3 (a) 参照) に具体例が示されている。

(作用効果) 内部応力を変化させる方法としては、図3 (a) に示すように、成膜時のアルゴンガス圧 (以下、Ar圧力という) を変化させる方法が知られている。この場合、Ar圧力を1.0～8.0mtorrまで変化させると、4.5mtorrを境にして、高圧力側で引張応力、低圧力側で圧縮応力が与えられる。

(13) 前記成膜工程において、成膜時のアルゴンガス圧を変化させることによって、前記形状記憶合金薄膜の厚

さ方向に内部応力を分布させることを特徴とする上記
(1)に記載の製造方法。

【構成】この発明は、全ての実施の形態に適用可能であるが、明細書中では、第1の実施の形態（図5参照）に具体例が示されている。

【作用効果】SMA薄膜自体に応力分布を与えることによって、積層膜相互の内部応力作用を用いることなく、室温状態でSMA薄膜を湾曲させ、加熱することによってSMA薄膜を形状記憶された平坦状に回復させることができる。

【0132】

【発明の効果】本発明によれば、半導体製造プロセスによって、所望形状のSMA薄膜を有するアクチュエータを効率良く且つ低コストで一貫製造することが可能な形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型アクチュエータの構成を示す斜視図であって、(a)及び(b)は、室温状態において片持ち梁が下向き及び上向き湾曲形状を成した状態を示す図、(c)は、加熱状態において片持ち梁が平坦形状に回復した状態を示す図。

【図2】(a)～(e)は、本発明の第1の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータの製造プロセスを示す図。

【図3】(a)は、TiNi合金から成るSMA薄膜の内部応力を変化させる方法を説明するための図であって、成膜時のアルゴンガス圧と内部応力との関係を示す図、(b)は、TiNi合金以外の金属から成るSMA薄膜の内部応力を変化させる方法を説明するための図であって、成膜時のアルゴンガス圧と内部応力との関係を示す図、(c)は、シリコンナイトライドから成る薄膜の内部応力を低減する方法を説明するための図であって、アンモニアガスの流量を150sccmから3sccmまで変化させた際のSiNの内部応力の実測値を示す図。

【図4】(a)及び(b)は、夫々、SMA薄膜の内部応力を計算する場合において、成膜したSMA薄膜の内部応力に起因したシリコン基板の歪みのたわみ量の実測値を示す図。

【図5】(a)～(n)は、SMA薄膜の厚さ方向に応力分布を与えた場合に生じる片持ち梁の湾曲状態を示す図。

【図6】本発明の第2の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した両持ち梁型アクチュエータの構成を示す斜視図であって、(a)は、室温状態において両持ち梁が上向きアーチ形状を成した状態を示す図、(b)は、加熱状態において両持ち梁が平坦形状に回復した状態を示す図、(c)は、本実施の形態の形状記憶合金薄膜アクチュエータを光偏向器として用いた際

の光の偏向状態を示す図。

【図7】本発明の第3の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したダイヤフラム型アクチュエータの構成を示す図であって、(a)及び(b)は、室温状態においてダイヤフラムが上向きドーム形状を成した状態を示す図、(c)及び(d)は、加熱状態においてダイヤフラムが平坦形状に回復した状態を示す図。

【図8】(a)は、第3の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを光偏向器として用いた際の光の偏向状態を示す図、(b)は、第3の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを可焦点ミラーとして用いた際の集光状態を示す図。

【図9】本発明の第4の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したマイクロポンプの構成を示す図であって、(a)～(g)は、マイクロポンプの動作説明図。

【図10】(a)は、図9に示されたマイクロポンプの斜視図、(b)は、マイクロポンプのダイヤフラムに一体的にパターンニングされた金属製薄膜ヒータの構成を示す図。

【図11】本発明の第5の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型二次元光偏向器の構成を示す図であって、(a)は、その平面図、(b)は、室温状態において片持ち梁が捩じれた上向き湾曲形状を成した状態を示す図、(c)は、加熱状態において片持ち梁が平坦形状に回復した状態を示す図。

【図12】図11に示された形状記憶合金薄膜アクチュエータの変形例であって、片持ち梁を駆動制御するための駆動回路及び制御回路が一体形成された片持ち梁型二次元光偏向器の構成を示す図であって、(a)は、その平面図、(b)は、室温状態において片持ち梁が捩じれた上向き湾曲形状を成した状態を示す図、(c)は、加熱状態において片持ち梁が平坦形状に回復した状態を示す図。

【図13】本発明の第6の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用した片持ち梁型光偏向器の構成を示す図であって、(a)は、その側面図、(b)は、室温状態において片持ち梁が下向き湾曲形状を成した状態を示す図、(c)は、加熱状態において片持ち梁が平坦形状に回復した状態を示す図。

【図14】本発明の第7の実施の形態に係る形状記憶合金薄膜アクチュエータを適用したダイヤフラム型点字表示素子の構成を示す図であって、(a)は、加熱状態においてダイヤフラムが平坦形状に回復した状態を示す図、(b)は、室温状態においてダイヤフラムが上向きドーム形状を成した状態を示す図、(c)及び(d)は、ダイヤフラム型点字表示素子の複数のダイヤフラムを点字パターンに対応して変形させた状態を示す斜視図。

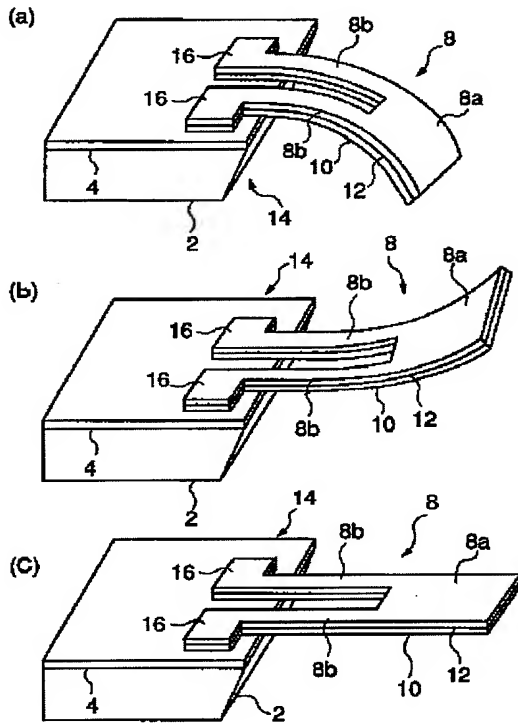
【符号の説明】

- 2 シリコン基板
 4 シリコン基板の表面に形成された絶縁膜
 6 シリコン基板の裏面に形成された絶縁膜

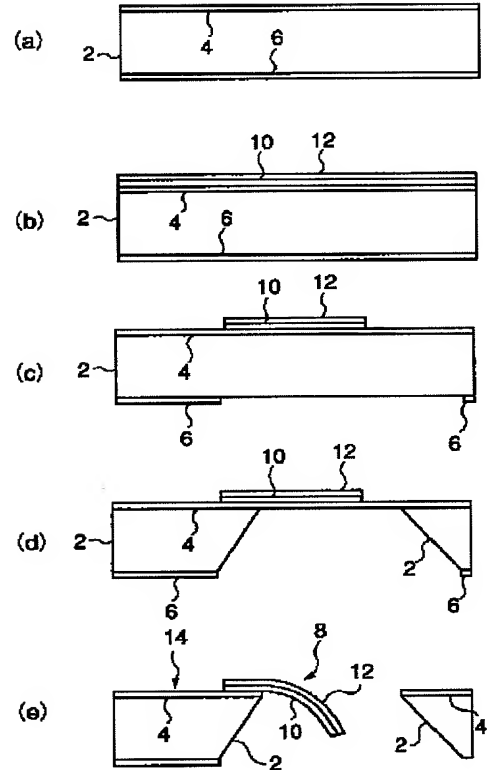
- * 10 下層薄膜
 12 上層薄膜

*

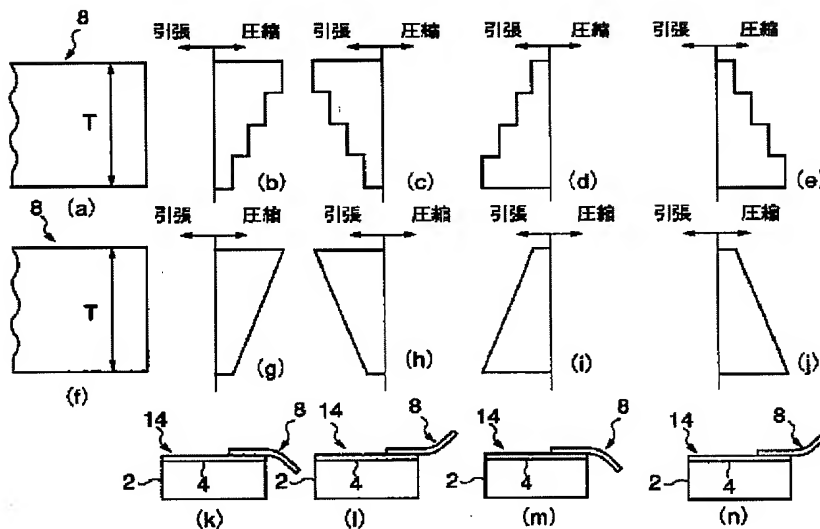
【図1】



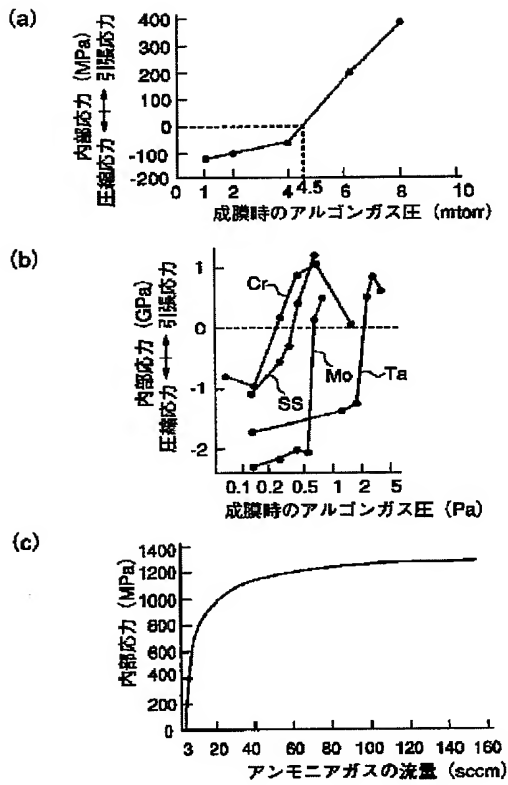
【図2】



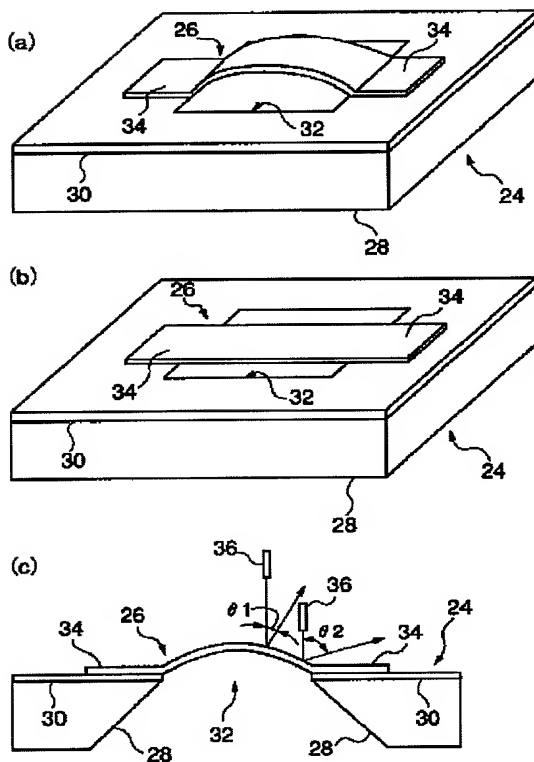
【図5】



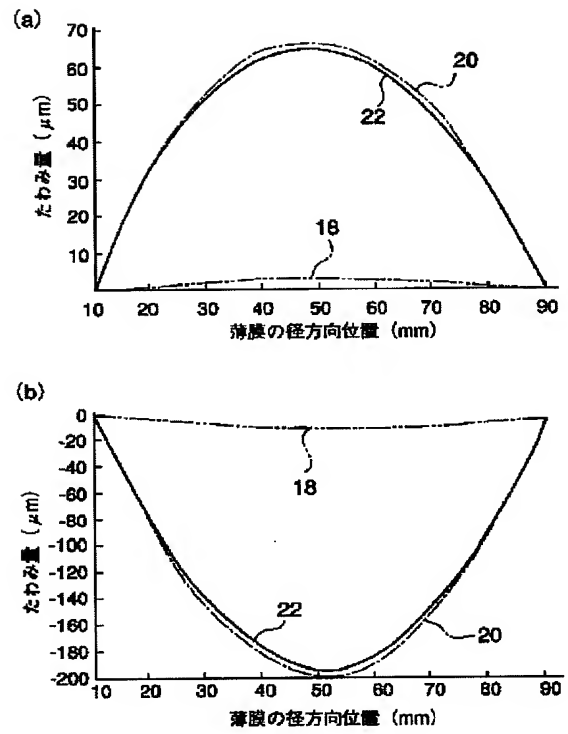
【図3】



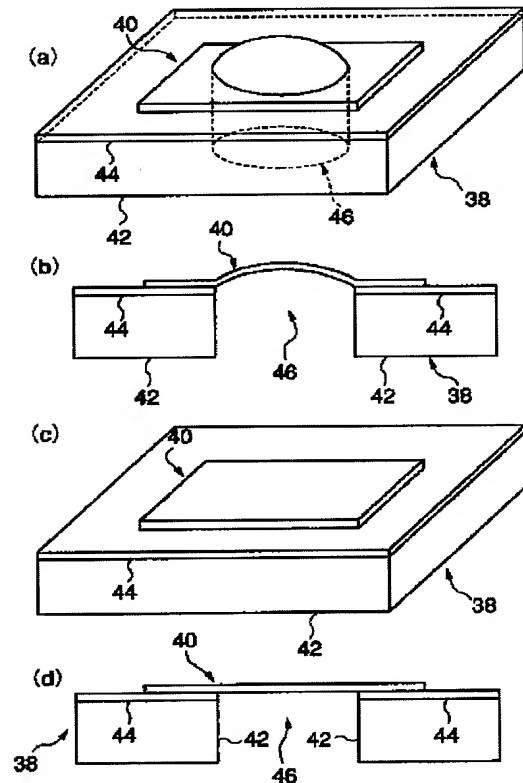
【図6】



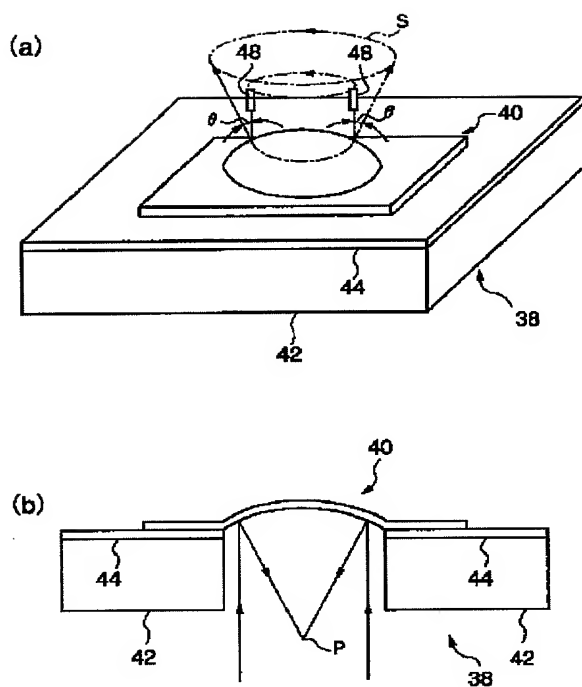
【図4】



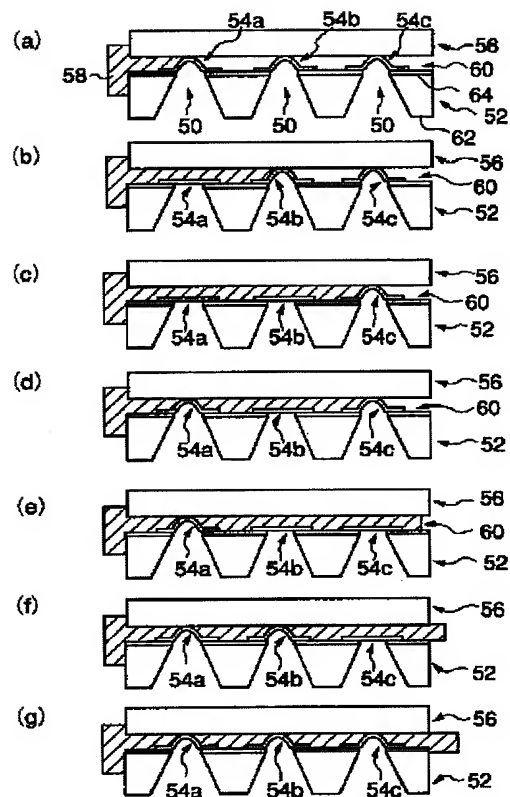
【図7】



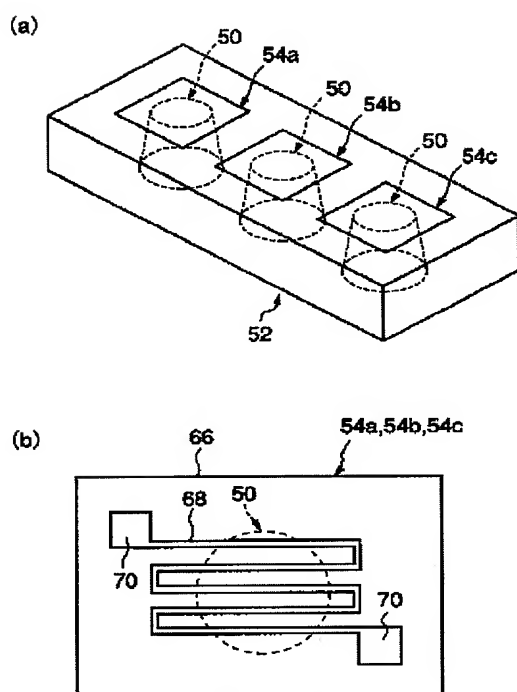
【図8】



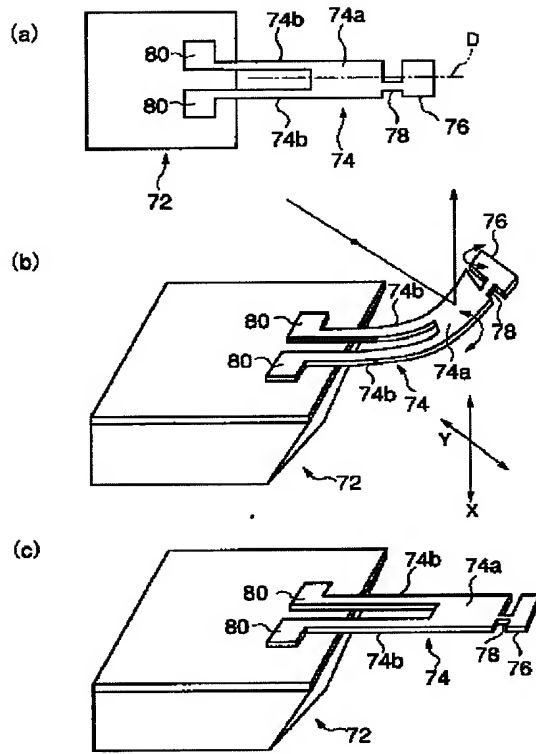
【図9】



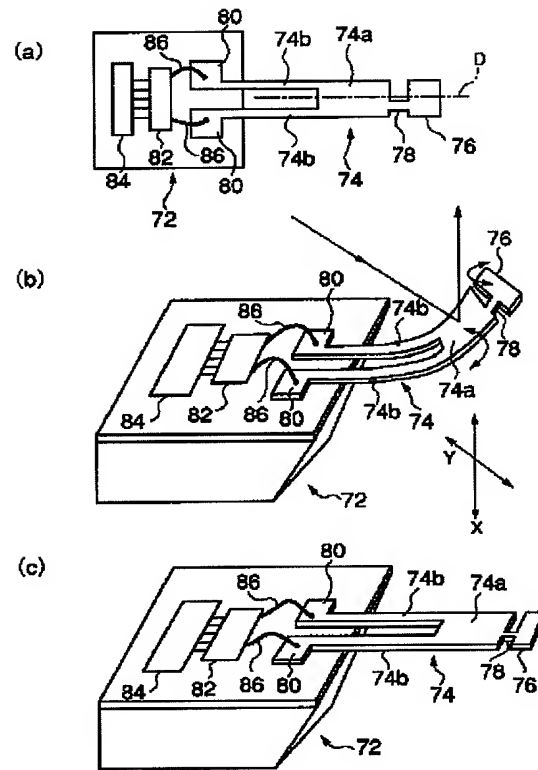
【図10】



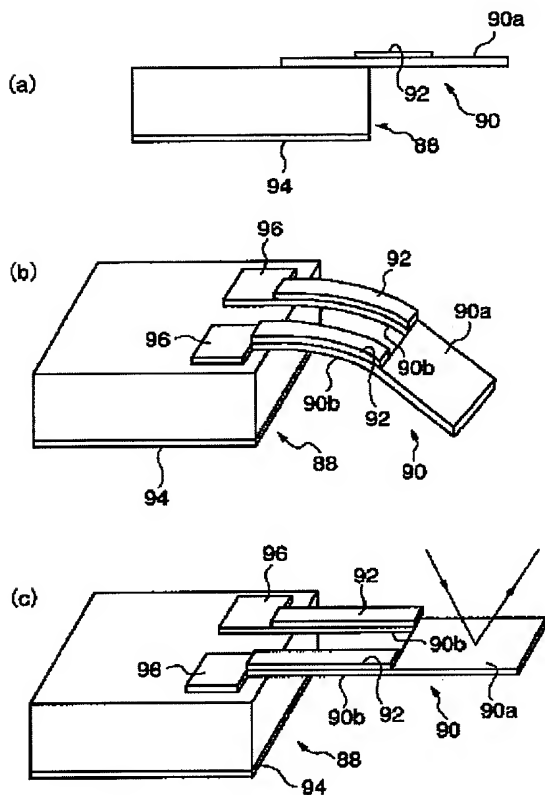
【図 11】



【図 12】



【図 13】



【図 14】

